



Das Kompetenzzentrum für industrielle Energieeffizienz der HS Ansbach untersucht die Auswirkungen der Ofenbeschickung auf die Leistungsdaten von Aluminiumschmelzöfen mittels Simulation (links: Beschickung, rechts: Entnahme Schmelzöfen).

Smart Melting: Steigerung der Energieeffizienz in der Schmelzerei von Aluminium-Schmelz- und Druckgussbetrieben

VON MATTHIAS HENNINGER, WOLFGANG SCHLÜTER, DOMINIK JECKLE UND JÖRG SCHMIDT, ANSBACH

Um am Weltmarkt bestehen zu können, ist es insbesondere für energieintensive Unternehmen wie zum Beispiel Schmelz- und Druckgussbetriebe überlebensnotwendig, einen hohen Automatisierungsgrad und eine hohe Energieeffizienz zu erreichen. Dies gilt auch für die Nichteisenmetall-Gießerei-Industrie, welche im Fokus der vorliegenden Studie steht. In Deutschland werden jährlich ungefähr 5,9 Mio. t Metall eingeschmolzen und vergossen, davon sind ca. 20 % Nichteisenmetall-Werkstoffe. Bei

einem abgeschätzten Energieeinsatz von 2000 kWh pro Tonne gutem Guss ergibt sich dafür ein jährlicher Energieverbrauch von 2,2 Mrd. kWh [1]. Nach Angaben des Bundesverbandes der Deutschen Gießerei-Industrie (BDG) betragen die Kosten für Energie in der Gießerei-Industrie 25 % der Bruttowertschöpfung [2]. Davon entfallen ungefähr 50 % des Energiebedarfs auf den Schmelzbereich [1]. Aufgrund des hohen Kosten- und Energieaufwandes wurde ebenfalls vom BDG eine Liste mit Empfehlungen für eine energieeffiziente Betriebsweise von Schmelzöfen erarbeitet [3].

Der effiziente Umgang mit Ressourcen – und speziell der Energie – ist durch

den Klimawandel und die Energiewende verstärkt in den Fokus der Forschung gerückt. Das Verbundforschungsprojekt Green Factory Bavaria ist in diesem Forschungsfeld angesiedelt [4]. Im darin enthaltenen Teilprojekt „Smart Melting“ werden neue Wege zur Steigerung der Energieeffizienz in der Aluminium-Druckgussindustrie untersucht. Der Schwerpunkt des Projektes liegt auf einer Verringerung des Energieverbrauchs von gasbetriebenen Schmelzöfen durch eine verbesserte Abstimmung zwischen den Teilbereichen Schmelzen und Druckgießen und einer daran gekoppelten intelligenten Betriebsweise der Schmelzanlagen und Aluminiumdistribution.

Um die Steuerungsmaßnahmen entwickeln zu können, müssen zunächst die Betriebsabläufe und Zusammenhänge innerhalb des kompletten Schmelz- und Druckgussbetriebes erfasst und verstanden werden. Dies erfolgt einerseits durch die Aufnahme und Analyse von Messdaten und andererseits durch die Entwicklung eines Simulationsmodells, welches insbesondere für die Untersuchung von Zusammenhängen, Schwachstellen und sich ändernden Rahmenbedingungen große Vorteile besitzt.

Grundlagen

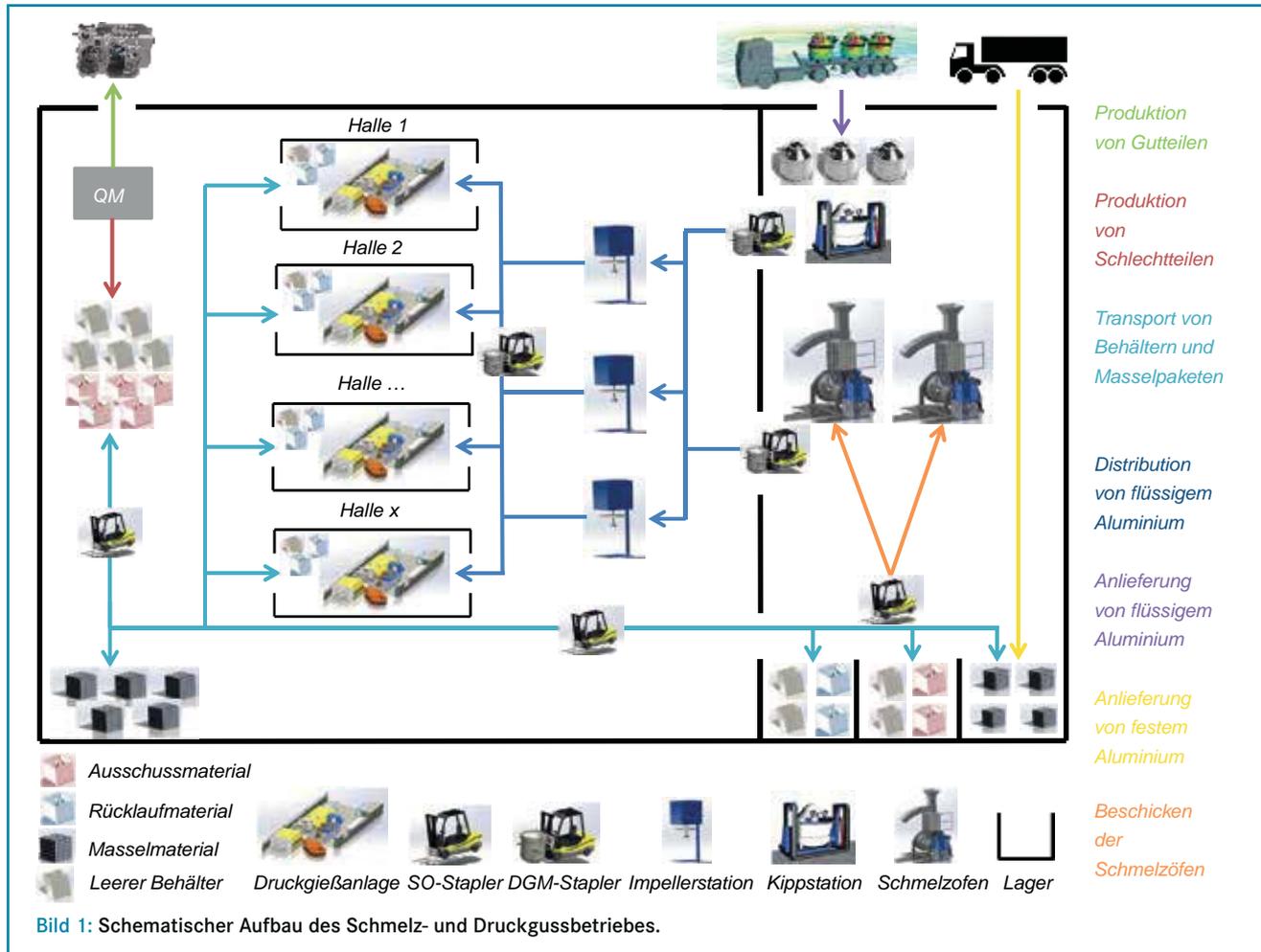
Aufbau des Schmelz- und Druckgussbetriebes

Die Grundlage, um ein Simulationsmodell entwickeln oder Schwachstellen im Betriebsablauf aufdecken zu können, ist immer eine zielgerichtete und realistische Analyse des zu betrachtenden Problems. Um garantieren zu können, dass mit der Verbesserungsmaßnahme das beste Ergebnis für den Gesamtbetrieb erreicht wird und keine relevanten Kopplungen vernachlässigt werden, ist es wichtig, den Betrieb in seiner Gesamtheit zu erfassen [5].

KURZFASSUNG:

Der Aufschmelzvorgang von Sekundäraluminium ist aufgrund des hohen Energiebedarfs, welcher bis zu 50 % des Gesamtenergiebedarfs beträgt, von besonderem Interesse für Energieeffizienzuntersuchungen und Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz. Im Kontext der Energiewende und dem damit verbundenen Streben nach steigender Ressourcen- und Energieeffizienz wurde von der Hochschule für angewandte Wissenschaften Ansbach das Forschungsprojekt „Smart Melting“ im Forschungsverbund Green Factory Bavaria initiiert. Im ersten Schritt des Forschungsprojektes werden der Schmelz- und Druckgussbetrieb des Kooperationspartners im Gesamten und relevante Prozesse wie die gasbetriebenen Schmelzeinrichtungen, welche den Schwerpunkt der vorliegenden Studie bilden, im Detail analysiert.

Die Auswertung von Messdaten eines Schachtschmelzofens ergibt einen spezifischen Energieverbrauch, der 25 % über der Herstellerangabe und eine Schmelzleistung, die nahe an der unteren Grenze des vom Hersteller angegebenen Bereichs liegt. Als Ursachen für die schlechten Leistungsdaten wird die diskontinuierliche Beschickung bzw. Betriebsweise infolge der fluktuierenden Aluminiumnachfragesituation identifiziert. Die aufgenommenen Messdaten und die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden anschließend für die Entwicklung und Validierung eines Simulationsmodells herangezogen. Dieses wird angewendet, um die Abhängigkeit der Ofeneffizienz von der Beschickung zu bestätigen und um Verbesserungsmaßnahmen ohne Eingriffe in die laufende Produktion und ohne zusätzliche Kosten untersuchen und bewerten zu können. Mit dem entwickelten Modell wird gezeigt, dass die Beschickung den spezifischen Energieverbrauch und die Schmelzleistung maßgeblich beeinflusst. So können durch Variation der Beschickung die Schmelzleistung um bis zu 50 % erhöht und der spezifische Energieverbrauch um bis zu 30 % verringert werden. Abschließend wird die Nutzung des Ofenabgases zur Vorwärmung von Masselmateriale simulativ untersucht.



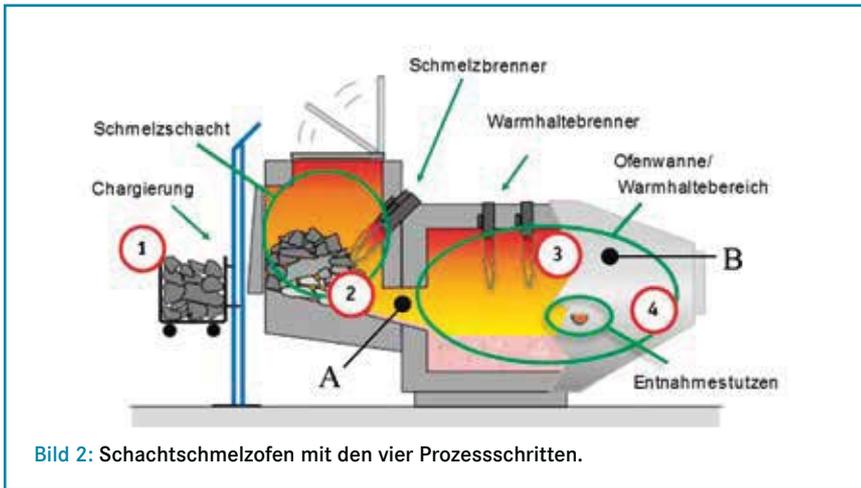


Bild 2: Schachtschmelzofen mit den vier Prozessschritten.

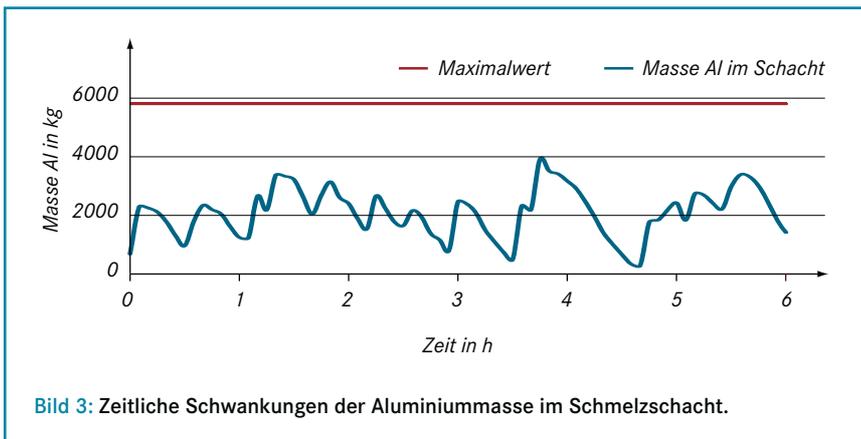


Bild 3: Zeitliche Schwankungen der Aluminiummasse im Schmelzschacht.

Die wichtigsten Anlagen und Zusammenhänge in einem Schmelz- und Druckgussbetrieb werden anhand von Bild 1 beschrieben. Die Anlieferung des Aluminiums erfolgt in fester (Masseln) beziehungsweise flüssiger Form. Das angelieferte Flüssialuminium kann direkt an die Druckgießmaschinen weiterverteilt werden. Das feste Aluminium hingegen muss vor der Weiterverarbeitung zunächst betriebsintern in Schmelzöfen aufgeschmolzen werden. Für den Aufschmelzvorgang wird das angelieferte Masselmateriale in der Regel mit sogenanntem Ausschuss- bzw. Rücklaufmaterial, welche Abfallprodukte des Gießprozesses bzw. der Bauteilnachbearbeitung sind, im Verhältnis 50 : 50 gemischt. Der Transport des festen bzw. flüssigen Aluminiums erfolgt mit Staplern.

In den Druckgießmaschinen erfolgt die Urformung der Bauteile. Die Anzahl der produzierten Teile und der Verbrauch an flüssigem Aluminium sind in besonderem Maße abhängig von Taktzeit und Schussgewicht der Anlage. Die Druckgießmaschinen sind die einzigen Aluminiumsenken und geben somit die Nachfrage an Flüssialuminium vor. Produktionsschwankungen der Druckgießmaschinen in Kombination mit ungenauer Datenlage zum Alu-

miniumverbrauch und den hochkomplexen Vorgängen im Schmelzofen machen es für den Produktionsleiter der Schmelzerei nahezu unmöglich, eine intelligente und ideal an die Situation angepasste Betriebsweise der Schmelzöfen zu gewährleisten. Dies hat zur Konsequenz, dass die Schmelzöfen häufig ebenfalls nicht gleichmäßig in einem idealen Betriebspunkt, sondern fluktuierend betrieben werden. Daraus resultiert ein erhöhter spezifischer Energieverbrauch infolge von Aufheiz- und Abkühlvorgängen des Ofens und energetisch ungünstigeren Wärmeübergangssituationen bei geringeren Ofenauslastungen.

Aufbau des Schachtschmelzofens

Die Funktion des simulierten und untersuchten Schachtschmelzofens mit kurzem Schacht kann in vier Teilfunktionen unterteilt werden (Bild 2). Durch die Chargiereinrichtung wird das feste Aluminium in den Schmelzschacht eingebracht (Funktion 1). Im Schmelzschacht wird das Aluminium durch die mit Erdgas befeuerten Schmelzbrenner erwärmt und geschmolzen (Funktion 2). Dabei wird durch die Brenner heißes Rauchgas erzeugt, welches das Aluminium umströmt und dabei einen Großteil seiner Energie an das

Aluminium abgibt. Je mehr Energie von diesem an das Aluminium übertragen wird, desto höher ist der Wirkungsgrad des Schmelzofens. Sowohl das erzeugte Rauchgas wie auch das geschmolzene Aluminium verlassen den Schmelzschacht in Richtung Warmhaltebereich (Ofenwanne). In dieser wird das flüssige Metall überhitzt und auf einer definierten Temperatur gehalten (Funktion 3). Für diesen Vorgang wird zum einen das Rauchgas der Schmelzbrenner und zum anderen, falls dieses nicht ausreicht, das Rauchgas der Warmhaltebrenner verwendet. Die Entnahme des Aluminiums erfolgt über den Entnahmestutzen durch Kippen des Ofens (Funktion 4).

Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz im Schmelzbetrieb

Betriebsweise und Energieverbrauch des Schachtschmelzofens

Eine energieeffiziente Betriebsweise des Schmelzofens erfordert eine kontinuierliche Betriebsweise in einem geeigneten Betriebspunkt und einen hohen Aluminiumfüllstand im Schmelzschacht. Für die Untersuchung des Ist-Zustandes wurden Messungen in einem Referenzbetrieb durchgeführt. Die im Folgenden beschriebenen Abbildungen und Tabellen beziehen sich alle auf eine charakteristische Messreihe.

In Bild 3 sind der Maximalwert und der gemessene Wert für die Aluminiummasse im Schmelzschacht dargestellt. Der reale Schachtfüllstand ist immer deutlich geringer als der maximal mögliche Schachtfüllstand und fluktuert sehr stark zwischen einem Minimalwert von 400 kg und einem Maximalwert von 4200 kg. Mit der immer wieder auftretenden Abnahme der Aluminiummasse ist eine Abnahme der wärmetauschenden Oberfläche und der treibenden Temperaturdifferenz zwischen Rauchgas und Aluminium verbunden. Daraus resultieren eine Abnahme des Wärmestroms vom Rauchgas an das Aluminium und somit eine erhöhte Rauchgasaustrittstemperatur des Ofens. Die Abnahme des Wärmestroms an das Aluminium verringert den thermischen Wirkungsgrad und erhöht den spezifischen Energieverbrauch des Ofens. Übersteigt die Rauchgasaustrittstemperatur einen definierten Grenzwert, wird die interne Brennersteuerung aktiv und verringert die Brennerleistung. Dies führt zu einer Abkühlung der Ofenwand, welche bei steigender Auslastung wieder aufgeheizt werden muss. Daher ist zu erwarten, dass die in Bild 3 dargestellte fluktuierende Betriebsweise die Leis-

tungskennwerte negativ beeinflusst. Die genannten negativen Auswirkungen werden durch einen Vergleich der gemessenen Leistungsdaten mit den Herstellerangaben bestätigt (Tabelle 1). So liegen der spezifische Energieverbrauch 25 % über und die Schmelzleistung mit 3,68 t/h im unteren Bereich der Herstellerangabe. Dabei muss berücksichtigt werden, dass im realen Betrieb Vorteile in Bezug auf die Wärmeübertragung aufgrund einer höheren spezifischen Oberfläche und Temperatur des eingebrachten Aluminiums gegenüber den Herstellerangaben vorliegen. Da die Herstellerangaben trotz dieser Vorteile nicht erreicht werden, müssen zusätzliche negative Einflüsse vorhanden sein. Die beschriebene diskontinuierliche Betriebsweise mit stark fluktuierendem Schachtfüllstand wird als signifikanter negativer Einfluss im Folgenden detailliert betrachtet.

Tabelle 1: Vergleich der Leistungsdaten zwischen realem Betrieb und Herstellerangabe.

	Spez. Energieverbrauch in kWh/t	Schmelzleistung in t/h
Herstellerangabe	+ 25 %	3,5-4,5
Gemessene Werte		3,68

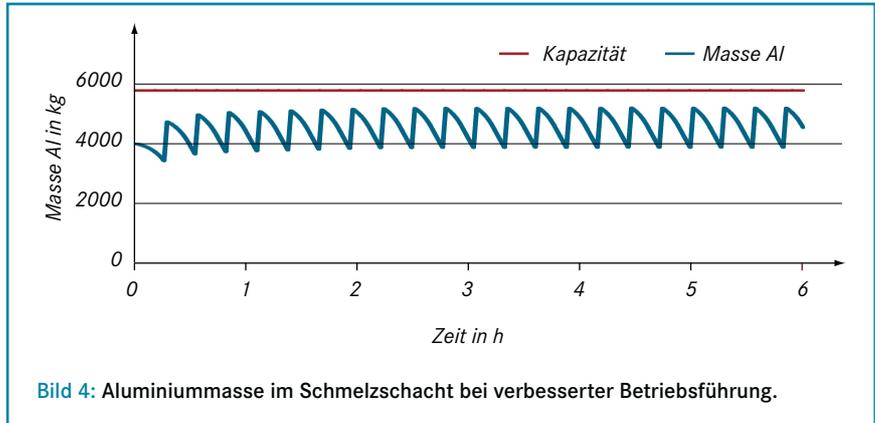


Bild 4: Aluminiummasse im Schmelzschacht bei verbesserter Betriebsführung.

Verbesserte Betriebsführung

Ziel der verbesserten Betriebsführung ist eine kontinuierliche Betriebsweise des Ofens mit maximaler Brennerleistung und gleichmäßig hoher Aluminiummasse im Schmelzschacht. Daraus sollen sich eine Verringerung des spezifischen Energieverbrauchs und eine Erhöhung der Schmelzleistung bei gleichbleibender Qualität des geschmolzenen Aluminiums ergeben. Bei einer angepassten Beschickungsstrategie (Bild 4) befindet sich die Masse immer im Bereich zwischen 3200 kg und 4800 kg. Der hohe Schachtfüllstand führt zu einer großen Wärmeübertragungsfläche und einer daraus resultierenden niedrigeren Abgastemperatur am Schachtaustritt. Kombiniert man

diese Effekte mit der konstanten Brennerleistung, sind eine Annäherung der Schmelzleistung und eine Verringerung des spezifischen Energieverbrauchs an die Herstellerangaben zu erwarten.

Abgastemperaturen

Der Wirkungsgrad der Wärmeübertragung im Schmelzofen liegt je nach Betriebssituation zwischen 25 und 50 %. Die Austrittstemperatur des Rauchgases aus dem Ofen ist besonders gut geeignet, um eine Aussage über die Energieeffizienz zu treffen. Dies liegt daran, dass diese ein Ergebnis aller Wärmeübergangsvorgänge innerhalb des Schmelzofens ist. Pauschal kann gesagt werden, dass die Effizienz

mit abnehmender Rauchgastemperatur zunimmt. In Bild 5 sind die Rauchgastemperaturen am Schachtende und Ofenaustritt eingetragen. Die Positionen dieser Messpunkte sind in Bild 2 mit A und B gekennzeichnet. Am Schachtende sind deutlich die Auswirkungen der Schwankungen des Aluminiumfüllstandes im Schmelzschacht (vgl. Bild 3) auf die Rauchgastemperatur erkennbar. So ist diese nach einem Beschickungsvorgang immer am niedrigsten und steigt mit zunehmendem zeitlichen Abstand zu diesem an. Die Rauchgastemperatur am Ofenaustritt verläuft wesentlich gleichmäßiger und bewegt sich im Korridor zwischen 850 °C und 1000 °C. Dies zeigt,



KREBS & RIEDEL
Schleifscheibenfabrik GmbH & Co. KG



Innovative Schleiftechnik seit 1895!

Trenn- und Schruppscheiben Unsere Werkzeugrocker - Ihre Vorteile:

- hohe Abtrags- und Trennleistung
- gute Standzeit
- kein Blauschliff
- hohe Zerspanleistung pro Zeiteinheit, dadurch kurze Schleifzeiten
- kühler Schliff und kraftsparendes Arbeiten

Wir beraten Sie bei jeder Schleifaufgabe und entwickeln gemeinsam mit Ihnen Ihre individuelle Schleifscheibe.

KREBS & RIEDEL
Schleifscheibenfabrik GmbH & Co. KG
Bremer Str. 44 • 34385 Bad Karlshafen
Tel.: +49 5672 184-0
Fax: +49 5672 184-218
E-Mail: mail@krebs-riedel.de
Web: www.krebs-riedel.de

Tabelle 2: Einsparpotenziale bei Integration einer Masselvorwärmung.

Vorwärmtemperatur in °C	Masselverbrauch in kg/d	Ideale Energieeinsparung ¹⁾ in kWh/d	Kosteneinsparung ²⁾ in €/d	Kosteneinsparung ²⁾³⁾ in €/a
100	40 000	2400	83,04	24 912
200	40 000	5400	186,84	56 052
300	40 000	8400	290,64	87 192

¹⁾Annahme eines mittleren Wärmeübertragungswirkungsgrades des Ofens von 33 %; ²⁾ als Gaspreis für Industriekunden wurden 3,46 Cent/kWh verwendet [6]; ³⁾ für die Berechnung wurden 300 Produktionstage angesetzt

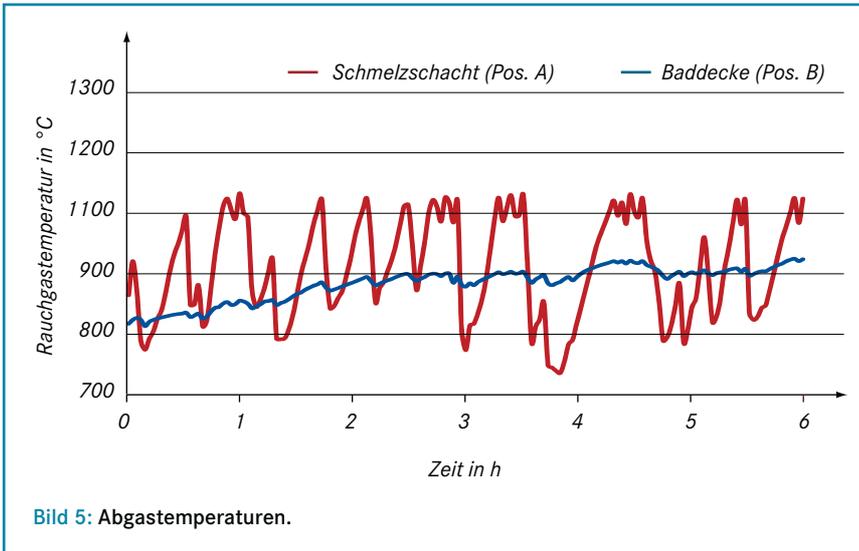


Bild 5: Abgastemperaturen.

dass im Rauchgas am Ofenaustritt noch ein hoher Energiegehalt vorhanden ist, welcher für eine Verbesserung des thermischen Gesamtwirkungsgrades des Ofens genutzt werden kann.

Energieeffizienzsteigerung durch externe Masselvorwärmung

Eine Möglichkeit dieses Potenzial zu nutzen, ist die Einführung einer externen Vorwärmkammer. Diese wird direkt neben dem Schmelzofen angebracht und verwendet den aus dem Ofen austretenden Abgasstrom für die Erwärmung von Masselmaterial. Dies führt zu einer weiteren Energieabgabe des Rauchgases und somit zu einer besseren Ausnutzung der durch die Brenner eingebrachten thermischen Energie. Durch die Energieübertragung werden die mit Raumtemperatur eingebrachten Aluminiummasseln auf eine definierte Temperatur erwärmt. Die Masseln mit erhöhter Temperatur werden anschließend in den Schmelzofen eingebracht. Im Schmelzschacht muss aufgrund der bereits zugeführten Energie weniger Energie übertragen werden, was zu einer höheren Schmelzleistung und einem geringeren spezifischen Energieverbrauch führt. Die externe Masselvorwärmung bietet sich bei den Schachtschmelzöfen mit kurzem Schacht aufgrund der

dort auftretenden hohen Rauchgastemperaturen am Ofenaustritt besonders an.

In **Tabelle 2** sind die Ergebnisse einer Überslagsberechnung zum Einsparpotenzial durch Vorwärmung der Aluminiummasseln aufgelistet. Mit zunehmender Vorwärmtemperatur erhöht sich die Kosteneinsparung linear. Dies liegt an der idealisierten Berechnung, in der davon ausgegangen wird, dass immer alle Masseln vorgewärmt werden können. Des Weiteren werden mögliche negative Effekte der Vorwärmung, wie die daraus resultierende geringere treibende Temperaturdifferenz zwischen Rauchgas und eingebrachtem Aluminium im Schmelzschacht, vernachlässigt. Die Kosteneinsparung bezieht sich ausschließlich auf die Einsparung aufgrund des geringeren Gasverbrauches. Die anfallenden Anschaffungs- und Betriebskosten der Vorwärmkammer werden nicht betrachtet.

Simulationsmodell

Um die Zusammenhänge der Prozessparameter, wie die Auswirkung der Ausfallzeiten und der Nachfragesituation der Druckgießmaschinen auf die Schmelzöfen, besser zu verstehen, wird der in Bild 1 dargestellte Schmelz- und Druckgussbetrieb mit einem Simulationsmo-

dell abgebildet. Nach erfolgter Validierung kann dieses dazu genutzt werden, unterschiedliche Betriebszustände zu untersuchen. Aus den Ergebnissen können dann Handlungsalternativen für die Aluminiumdistribution, die Betriebsweise der Druckgießanlagen und der Schmelzöfen generiert werden. So kann zum Beispiel die optimale Reaktion auf einen Ausfall eines Schmelzofens oder die Verspätung eines Flüssigaluminiumtransports abgeleitet werden. Mithilfe des Simulationsmodells können Verbesserungsmaßnahmen wie zum Beispiel die verbesserte Beschickung (vgl. Gliederungspunkt „Betriebsweise und Energieverbrauch des Schachtschmelzofens“, S. 52) und die Vorwärmung (vgl. Gliederungspunkt „Energieeffizienzsteigerung durch externe Masselvorwärmung“, S. 54) kostengünstig und risikofrei in einer virtuellen Umgebung analysiert werden, ohne in den realen Betrieb eingreifen zu müssen. Das entwickelte Simulationsmodell setzt sich aus einem Materialflussmodell und einem Energiemodell, welches die energetischen Vorgänge in den Schmelzöfen detailliert abbildet, zusammen.

Materialflusssimulation

Im Materialflussmodell werden der Aluminiumtransport und die Verarbeitung des Aluminiums in den Druckgießmaschinen auf der Grundlage von Bild 1 abgebildet. Das Modell erfasst unter anderem die Stapler, deren Steuerung sowie die Druckgießmaschinen. Die Staplersteuerung beinhaltet sowohl die Strategie der Verteilung des flüssigen Aluminiums an die Druckgießmaschinen wie auch die gewählte Reihenfolge der Beschickung der Schmelzöfen. Dieses Modell bildet somit die Ein- und Ausgänge des Energiemodells und nimmt somit Einfluss auf die Betriebsweise des Schmelzofens im Simulationsmodell. Damit lassen sich in der Simulation die Auswirkungen unterschiedlicher Nachfragesituationen und Beschickungsstrategien der Schmelzöfen untersuchen [7].

Energiemodell der Schmelzöfen

Im Schmelzofen finden die Verbrennung von Erdgas durch Brenner, der Phasenübergang des Aluminiums sowie Wärme- und Stofftransportvorgänge (Leitung, Konvektion, Strahlung) statt. Zur exakten Erfassung und Abbildung der Problematik müsste auf Strömungssimulationen (CFD) zurückgegriffen werden. Diese führen jedoch zu sehr komplexen Modellen mit hohem Rechenaufwand und geringer Flexibilität hinsichtlich sich ändernder Rahmenbedingungen. Für die Simulation von

längeren Zeitabschnitten mit permanent wechselnden Rahmenbedingungen wird daher das mathematische Modell auf einen Satz gewöhnlicher Differenzialgleichungen vereinfacht.

Um die Güte des erarbeiteten Modells zu erhöhen, werden unterstützende Simulationen von verschiedenen stationären Fällen mit einem CFD-Programm durchgeführt. Wegen der Vereinfachungen und zusätzlicher Annahmen kommt der Validierung des Modells anhand von Messdaten große Bedeutung zu. Detaillierte Angaben zum Energiemodell sind unter [8] zu finden.

Validierung des Materialflusses

Beim Vergleich der kompletten Materialflusssimulation mit realen Betriebsdaten ergab sich über eine Kalenderwoche bei der Zahl der produzierten Gussteile eine Abweichung von 14,5 %. Die Abweichung ist im Wesentlichen auf die durch einen statistischen Ansatz in der Simulation berücksichtigten ungeplanten Stillstände der Druckgießmaschinen zurückzuführen. Durch den statistischen Ansatz, der nur von einer normalverteilten mittleren Ausfallzeit der Druckgießmaschinen (ermittelt aus realen Ausfallzeiten im Betrieb des Kooperationspartners) ausgeht, wird keine genaue Differenzierung der Ausfälle vorgenommen und es kommt zu Abweichungen zwischen den simulierten und den tatsächlichen unvorhergesehenen Stillständen.

Validierung des Energiemodells

Da das Energiemodell des Schmelzofens unter starken Vereinfachungen und zahlreichen Annahmen entwickelt wird, kommt der Validierung hier große Bedeutung zu. Bei einem Vergleich mit Messwerten, die im Betrieb des Kooperationspartners erhoben wurden, zeigt sich eine gute Übereinstimmung beim zeitlichen Verlauf der festen Aluminiummasse im Schmelzschacht (Bild 6a). Die Masse an flüssigem Aluminium in der Ofenwanne ist direkt daran gekoppelt und kann somit auch gut abgebildet werden. Der Vergleich bei der Abgastemperatur des Rauchgases zeigt, dass der zeitliche Verlauf der Wärmeübertragung vom Rauchgas auf das feste Aluminium in der Simulation richtig abgebildet wird (Bild 6b). Damit kann davon ausgegangen werden, dass der Materialfluss mit dem Phasenübergang fest-flüssig im Schmelzofen in der Simulation ausreichend genau wiedergegeben werden kann.

Die Genauigkeit des Schmelzofenmodells wird zusammen mit weiteren Prozessgrößen anhand der durchschnittli-

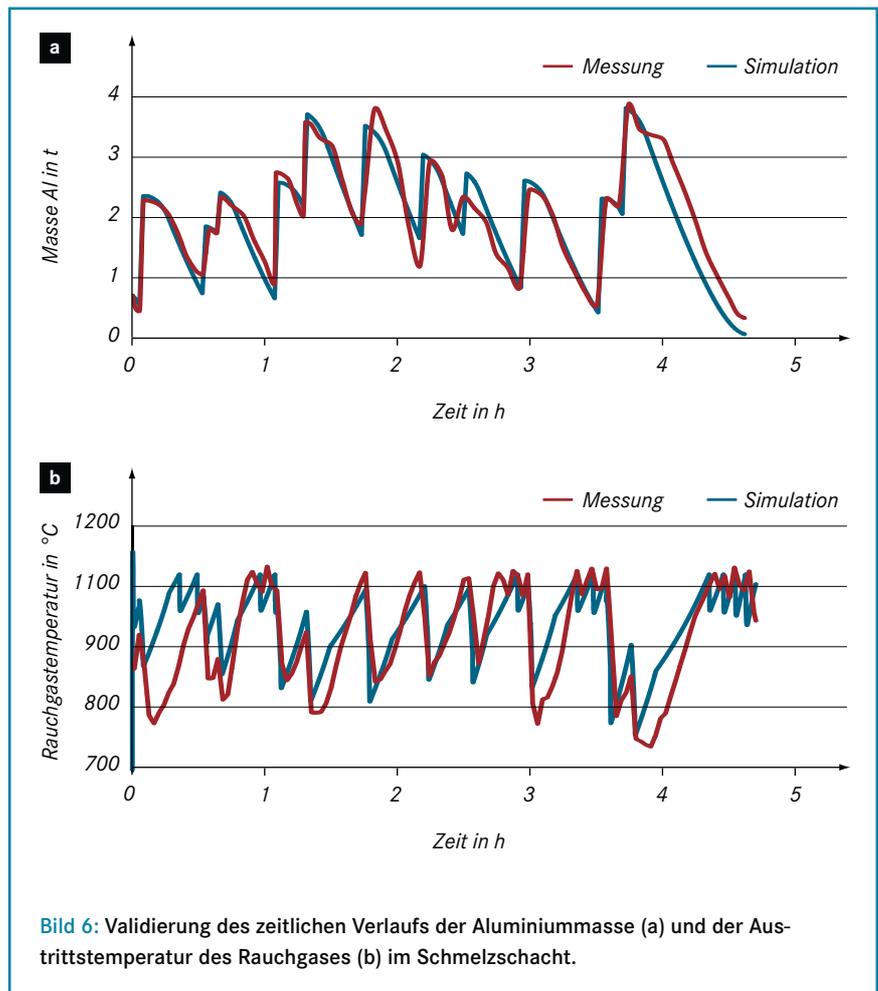


Bild 6: Validierung des zeitlichen Verlaufs der Aluminiummasse (a) und der Austrittstemperatur des Rauchgases (b) im Schmelzschacht.

chen Abweichungen zwischen Messung und Simulation auch quantitativ betrachtet (Tabelle 3). Für die Masse an flüssigem Aluminium in der Ofenwanne ist die Abweichung mit 2,6 % sehr gering. Für die Bewertung der Qualität der Modellierung der Wärmeübertragung ist die Abgastemperatur am Austritt des Schmelzschachtes von besonderer Bedeutung. Dies liegt daran, dass diese aus der Wärmeübertragungssituation innerhalb des kompletten Schachtes resultiert. Auch hier differieren Messung und Simulation nur in geringem Maße.

Die korrekte Abbildung der Wärmeübertragung ist mit der implementierten Brennersteuerung entscheidend für die reale Erfassung des Gasverbrauches der Brenner. Bei einem Vergleich zwischen Messung und Simulation ergibt sich eine Differenz von 0,5 %, sodass davon ausgegangen werden kann, dass auch der Gasverbrauch der Brenner von der Simulation richtig bestimmt wird. Damit wird die Berechnung des spezifischen Energieverbrauchs pro geschmolzene Tonne Aluminium möglich und es können mit der Simulation verschiedene Betriebsstrategien in ihrer Auswirkung auf die Energieeffizienz des Schmelzbetriebes getestet werden.

Tabelle 3: Quantitativer Vergleich zwischen Messwerten und Simulationsergebnissen.

Parameter	Abweichung zur Messung in %
Masse Aluminium Ofenwanne	2,6
Abgastemperatur Schmelzschacht	6
Gasverbrauch	0,5
Masse Aluminium im Schacht	10,4
Masse an geschmolzenem Aluminium	1,5

Ergebnisse der Simulationsstudien

Das entwickelte und validierte Simulationsmodell wird verwendet, um die Auswirkungen der Beschickungsstrategie und der Abgasnutzung durch Aluminiumvorwärmung auf die Energieeffizienz und Schmelzleistung des Schmelzofens zu untersuchen. Für den Schmelzofen können die Beschickung, die Entnahme und somit die Ofenauslastung als Randbedingungen vorgegeben werden. Die Untersuchungen erfolgen unter der Annahme idealer Bedingungen, d. h. betriebsbedingte externe

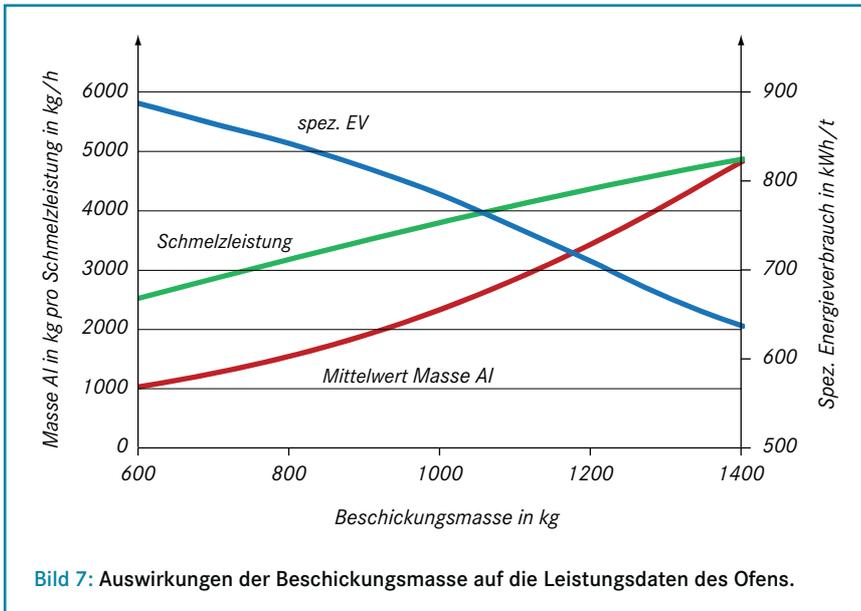


Bild 7: Auswirkungen der Beschickungsmasse auf die Leistungsdaten des Ofens.

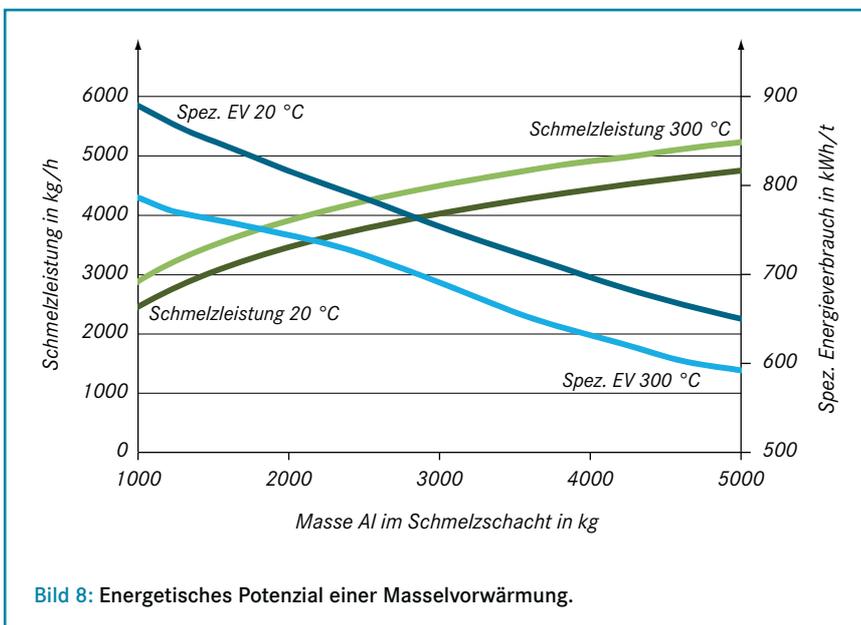


Bild 8: Energetisches Potenzial einer Masselvorwärmung.

Beeinträchtigungen des Ofenbetriebs werden nicht berücksichtigt.

Beschickungsstudie

In der Simulationsstudie erfolgt die Entnahme einer konstanten Masse an Aluminium immer, wenn 90 % des maximalen Füllstandes des Warmhaltebereichs überschritten sind. Dies garantiert, dass der Ofen kontinuierlich betrieben wird. Um die Auswirkungen der Beschickungsstrategie untersuchen zu können, wird die mit einem Chargiervorgang eingebrachte Aluminiummasse mit jedem Simulationsdurchlauf variiert. Die Masse des alle 1000 s ausgeführten Chargiervorgangs wird mit jedem Simulationsdurchlauf um 100 kg erhöht. Es wird immer eine Schicht (8 h) simuliert. Das chargierte Material setzt sich aus 50 % Massel- und 50 % Ausschussmaterial, welches Raumtemperatur besitzt, zusammen.

Für die Auswertung werden die Konsequenzen der Beschickung für den Mittelwert des Schmelzschachtfüllstands, der Schmelzleistung und des spezifischen Energieverbrauchs betrachtet (Bild 7). Es ist zu erkennen, dass der Mittelwert der Aluminiummasse im Schmelzschacht mit steigender Masse pro Beschickung zunimmt. Mit diesem Anstieg ist eine Erhöhung der Schmelzleistung bei gleichzeitiger Verringerung des spezifischen Energieverbrauchs (EV) verbunden. So steigt die Schmelzleistung von ca. 2500 kg/h für eine Beschickungsgröße von 600 kg auf eine Schmelzleistung von ca. 4800 kg für eine Beschickungsgröße von 1400 kg. Dies entspricht nahezu einer Verdoppelung der Schmelzleistung. Der spezifische Energieverbrauch nimmt mit steigender Aluminiummasse im Schacht von 890 kWh/t auf 640 kWh/t ab. Dies entspricht einer Reduktion des Gasver-

brauchs um 28 %. Dies zeigt, dass der Schachtfüllstand, welcher durch die Beschickung vorgegeben wird, für die Schmelzleistung und den spezifischen Energieverbrauch von herausragender Bedeutung ist.

Studie zur Masselvorwärmung

Die Messdaten zum untersuchten Schmelzofen zeigen, dass am Ofenaustritt Rauchgastemperaturen zwischen 800 und 1000 °C vorliegen (Bild 5). Aufgrund dieser hohen Temperatur ist das Rauchgas für die externe Vorwärmung von Masselmaterial sehr gut geeignet. In Bild 8 sind die Ergebnisse einer Simulationsstudie zu den Auswirkungen der Vorwärmung grafisch aufbereitet. Es wird ein Vergleich zwischen der Vorwärmung der Aluminiummasseln auf 300 °C und einer fehlenden Vorwärmung (Masseltemperatur 20 °C) durchgeführt. In beiden Fällen beträgt die Temperatur des Rücklauf- bzw. Ausschussmaterials 100 °C. Die Auswirkungen werden für unterschiedliche Füllstände des Ofenschmelzschachtes betrachtet. Die Schmelzleistung steigt für beide Vorwärmtemperaturen, wie in der vorhergehenden Studie beschrieben, mit steigender Masse im Schacht um ca. 2500 kg/h an. Durch die Vorwärmung werden die Schmelzleistung um ca. 500 kg/h erhöht und der spezifische Energieverbrauch um 45 bis 90 kWh/t verringert. Dies bestätigt das große energetische Potenzial der Masselvorwärmung.

Zusammenfassung und Ausblick

In der hier beschriebenen Arbeit wird anhand der Auswertung einer Messkampagne zum Schachtschmelzofen gezeigt, dass dessen spezifischer Energieverbrauch bis zu 25 % über der Angabe des Herstellers liegt. Auch die gemessene durchschnittliche Schmelzleistung liegt an der unteren Grenze der Herstellerangabe. Die Analyse der Messdaten zeigt, dass die schlechten Leistungsdaten insbesondere auf eine diskontinuierliche Betriebsweise und eine ungünstige Beschickungsstrategie zurückzuführen sind. Aus den Messdaten geht hervor, dass die Rauchgastemperaturen am Ofenaustritt im Bereich zwischen 850 und 1000 °C liegen. Als Möglichkeit, den hohen Energieinhalt im Rauchgas am Ofenaustritt nutzen zu können, wird die externe Vorwärmung von Masselmaterial in einer sogenannten Vorwärmkammer untersucht.

Aus der Bestandsaufnahme eines realen Betriebes und der Analyse der Messdaten wird ein Simulationsmodell eines

kompletten Schmelz- und Druckgussbetriebes aufgebaut und validiert. Mit dem Modell kann bestätigt werden, dass die Betriebsweise und der Füllstand eines Schmelzofens eine herausragende Bedeutung für die Schmelzleistung und den spezifischen Energieverbrauch besitzen. So differieren die Schmelzleistung zwischen zwei betrachteten Extremwerten des Schachtfüllstandes um bis zu 50 % und der spezifische Energieverbrauch um bis zu 30 %. Die simulative Untersuchung der Vorwärmung von Masselmateriale durch eine externe Vorwärmung zeigt, dass mit dieser der spezifische Energieverbrauch je nach Betriebspunkt um 45 bis 90 kWh/t reduziert und die Schmelzleistung um bis 500 kg/h erhöht werden kann.

Ziel von weiteren Untersuchungen ist es, verschiedene Maßnahmen, welche eine kontinuierliche Betriebsweise eines Schmelzofens in einem weitgehend idealen Betriebspunkt ermöglichen, in das Simulationsmodell des Gesamtbetriebes zu implementieren und auf ihre Auswirkungen im Betriebsablauf hin zu untersuchen. Eine dieser Maßnahmen ist eine bedarfs- und zeitoptimierte Anlieferung von Flüssigaluminium, weitere sind die Berech-

nung der optimalen Freischmelzzeitpunkte, die intelligente Stand-by-Schaltung von Öfen bei geringer Nachfrage nach Flüssigaluminium und eine bedarfsorientierte Steuerung der Schmelzleistung der Schmelzöfen. Neben der dazu notwendigen Weiterentwicklung des Simulationsmodells müssen die gefundenen Verbesserungsstrategien anhand von weiteren Messungen im realen Betrieb überprüft und bestätigt werden.

B. Eng. Matthias Henninger, Prof. Dr. Wolfgang Schlüter, M.Sc. Dominik Jeckle und M.Sc. Jörg Schmidt, Hochschule für angewandte Wissenschaft Ansbach, Ansbach

Literatur:

- [1] Herrmann, C.; Pries, H.; Hartmann, G.: *Energie- und ressourceneffiziente Produktion von Aluminiumdruckguss*. Springer Vieweg, Berlin, 2013.
- [2] Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie. URL: <http://www.bdguss.de/themen/energie/#.V2frgaL7MQM>. Zugriffsdatum: 20.06.2016.
- [3] Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie. *Energieeffizienter Gießereibetrieb 2.0*. URL: http://effguss.bdguss.de/?page_id=29. Zugriff: 20.06.2016.

- [4] Green Factory Bavaria (2016). URL: <http://www.greenfactorybavaria.net>.
- [5] Hermann, C.: *Ganzheitliches life cycle management*. Springer, Heidelberg, 2010.
- [6] Bundesnetzagentur. *Monitoringbericht 2015*. pp 318 ff. URL: http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2015/Monitoringbericht_2015_BA.pdf?__blob=publicationFile&v=3. Zugriff: 15.06.2016.
- [7] Jeckle, D.; Schlüter, W.; Ringleb, A.: *Objektorientierte Entwicklung einer hybriden Materialflusssimulation eines NE-Schmelz- und Druckgussbetriebes*. Konferenz ASIM/GI-Fachgruppen: Simulation technischer Systeme, Stralsund, 2015. S. 49-56.
- [8] Schmidt, J.; Schlüter, W.: *Ein dynamisches Prozesssimulationsmodell für die energetische Betrachtung von Aluminium-Schmelzöfen in einer betriebsumfassenden Materialflusssimulation*. Konferenz ASIM/GI-Fachgruppen: Simulation technischer Systeme, Lippstadt, 2016. S. 29-36.

OUR HERITAGE, YOUR ADVANTAGE **YASUGI SPECIALTY STEEL**

Hitachi Metals



Yasugi Specialty Steel - Gestaltung globaler Innovationen ausgehend von einzigartiger japanischer Tradition

Materials for tools and cutlery

DAC-MAGIC

Hochleistungsstahl für Druckgussensätze entwickelt für extreme Anforderungen

DAC-Magic-Ihr Vorteil durch Optimierung von:

- Warmfestigkeit
- Zähigkeit
- Brandrissbeständigkeit
- Spannungsrissskorrosionsbeständigkeit
- Bearbeitbarkeit



Hitachi Metals Europe GmbH
 Immermannstrasse 14-16, 40210 Düsseldorf, Germany
 TEL +49-(0)211-16009-95 FAX +49-(0)211-16009-60
 Email: special_steel@hitachi-metals-europe.com
www.hitachi-metals.co.jp/e/

INTEC
 Halle 3
 Stand F41

Funktionelle Lösungen zu Ihrem Vorteil.



PUNKT-Speiser®

PUNKTGENAU

- ✓ PUNKT-Speiser® für kleinste Aufsatzflächen
- ✓ Aufformdorn federnd oder starr
- ✓ Speiserhals rund oder oval

ZUVERLÄSSIG

- ✓ Prozesssichere Brechkante
- ✓ Reduzierte Putzkosten
- ✓ Fehlerfreie Gussoberfläche
- ✓ Fluorarme oder fluorfreie Qualität lieferbar

INTELLIGENT

- ✓ Gute Formstoffverdichtung unter dem Speiser
- ✓ Definiertes Speiservolumen
- ✓ Optimierte Speiserhals-Geometrie

Unsere ganze Energie für gute Speiser.






Telefon 0 21 81/2 33 94-0
www.gtp-schaefer.de